

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.672

### КОЭФФИЦИЕНТ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ И ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, Т.В. ВИГЕРИНА  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлены исследования условий, позволяющих управлять значениями коэффициента температурного расширения покрытия из порошковых материалов при восстановлении деталей и внутренних напряжений второго рода в материале этих покрытий. Получена зависимость коэффициента термического расширения от расхода плазмообразующего газа, расстояния от сопла до детали, диаметра сопла, процентного содержания меди в покрытии, грануляции исходного порошка и зависимость искажений кристаллической решетки от расхода плазмообразующего газа, расстояния от сопла до детали, диаметра сопла, грануляции исходного порошка. Наибольшее влияние на изменение коэффициента температурного расширения материала покрытия оказывают процентное содержание меди в исходной композиции порошка и расход плазмообразующего газа. На изменение внутренних напряжений второго рода в частицах покрытия оказывают диаметр сопла, расстояние от сопла до детали и грануляция частиц порошка.*

*Полученные качественные и количественные зависимости влияния состава исходного материала и значений режимов плазменного напыления покрытий из порошков позволяют управлять коэффициентом термического расширения материала покрытий и внутренними напряжениями в них.*

**Введение.** Покрытия, наносимые на поверхности деталей при их восстановлении, должны обладать множеством свойств, обеспечивающих длительную работоспособность. К таким свойствам относятся: прочность соединения с основой, износостойкость, усталостная прочность и ряд других. Большое влияние на них оказывают коэффициент теплового расширения (КТР) и внутренние напряжения второго рода.

В.И. Черноиванов и Э.С. Каракозов отмечали [1], что в качестве исходного материала при нанесении покрытий с использованием источников тепла целесообразно использовать порошки. Они позволяют регулировать в широких пределах химический и фазовый состав покрытий смешиванием в исходном состоянии порошков различного состава [2, 3]. Покрытия из порошковых материалов наносят прогрессивными способами газотермического напыления, газопорошковой наплавки, электроконтактной приварки, индукционного напекания и др. [4].

По Я.И. Френкелю [5], тепловое расширение металлов и сплавов является следствием асимметрии сил притяжения и отталкивания между атомами кристаллической решетки в процессе колебательных движений, совершаемых ими около положения равновесия. При повышении температуры, т.е. увеличении энергии колебаний атомов, асимметрия сил притяжения и отталкивания изменяется в сторону возрастания сил отталкивания, при этом увеличивается смещение атомов относительно друг друга. Смещение атомов, суммируясь по всей кристаллической решетке, приводит к изменению объема и линейных размеров тела. Это явление носит обратимый характер. В общем случае КТР металла является сложной функцией, зависящей от его вида, структуры, теплоемкости, температуры кипения и плавления, энергии химической связи и других факторов.

Для большинства металлов (при отсутствии фазовых превращений) обнаружено возрастание КТР с повышением температуры. Вследствие теплового расширения происходит возникновение временных и остаточных напряжений в местах сопряжения слоев из разнородных металлов при их нанесении и нагреве. Частицы при их ударном осаждении на восстанавливаемую поверхность испытывают значительную пластическую деформацию, отчего материал покрытия приобретает состояние наклепа. Наклеп приводит к образованию большого числа поверхностей сдвига и дроблению блоков мозаичной структуры, к повышению прочности, твердости и уменьшению пластичности макрообъемов покрытия. Одновременно этот процесс порождает упругие искажения кристаллической решетки, что создает многочисленные препятствия перемещению дислокаций. Пластическое деформирование способствует уменьшению объема частиц и появлению преимущественно сжимающих напряжений. Последующее охлаждение покрытия приводит к дальнейшему уменьшению объема частиц, что приводит к уменьшению первоначальных напряжений сжатия закрепившихся частиц за счет их всестороннего растяжения.

**Цель работы** заключалась в определении условий, позволяющих управлять значениями КТР покрытия из порошковых материалов при восстановлении деталей и внутренних напряжений второго рода в материале этих покрытий.

**Методы и аппаратура.** Исследование зависимости среднего значения КТР плазменного покрытия из порошков было проведено в отрезке его рабочей температуры (0...100 °С) при изменении факторов процесса и состава исходного материала (таблица).

Характеристика факторов процесса нанесения плазменных покрытий при исследовании коэффициента термического расширения и внутренних напряжений второго рода

Факторы, обозначение	Размерность	Значения
Сила тока плазменной дуги, $I$	А	250; 275; 300; 325; 350
Расход плазмообразующего газа (азота), $Q$	л/мин	20; 25; 30; 35
Расстояние от сопла до детали, $L$	мм	125; 150; 175; 200
Грануляция стального порошка (основы), $Gr$	мкм	63...100; 100...160; 160...200
Процентное содержание меди в порошке (по массе), $Cu$	%	0; 5; 10; 15
Диаметр сопла, $d$	мм	5; 5,5; 5

При измерении КТР материала покрытия был применен тензометрический метод, предложенный Е.Ю. Нехендзи [6]. Другие методы оказались непригодными по причине невозможности изготовления требуемых образцов из материала покрытия.

На противоположные стороны отделенного от поверхности детали элемента покрытия размерами 32×12×2 мм клеем БФ-2 закреплялись два тензометрических датчика ПКБ-10-100. Наклеивание датчиков на противоположные стороны образца исключало погрешность измерения КТР из-за коробления образца при его нагреве. Тензометрические датчики соединялись между собой последовательно, сопротивление их измерялось с помощью моста МО-62.

Сопротивление тензодатчиков и свободной проволоки измерялось при значениях температуры 50 и 100 °С. Образцы нагревали в термощкафу. Температура измерялась лабораторным ртутным термометром (ГОСТ 215-57) с пределом измерений 0...150 °С.

Для вычисления КТР материала покрытия  $\alpha$  использовали формулу, полученную из выражения для температурного коэффициента сопротивления наклеенного тензодатчика [4]:

$$\alpha = \frac{\beta_o - \beta_n}{\Phi} \alpha_n, \quad (1)$$

где  $\beta_o$  и  $\beta_n$  – соответственно температурные коэффициенты сопротивления наклеенного датчика и тензометрической проволоки;  $\Phi$  – коэффициент тензометрической чувствительности;  $\alpha_n$  – коэффициент теплового расширения тензометрической проволоки.

В работе [6] в соответствии с формулой (1) разработан графический метод определения КТР, не требующий каких-либо расчетов и введения поправок в эту формулу.

Для определения КТР находили разность температурных приращений сопротивления наклеенных тензодатчиков  $(\Delta R/R)_o = f(t)$  и свободной проволоки  $(\Delta R/R)_n = f(t)$ :

$$\delta(t) = (\Delta R/R)_o - (\Delta R/R)_n \quad (2)$$

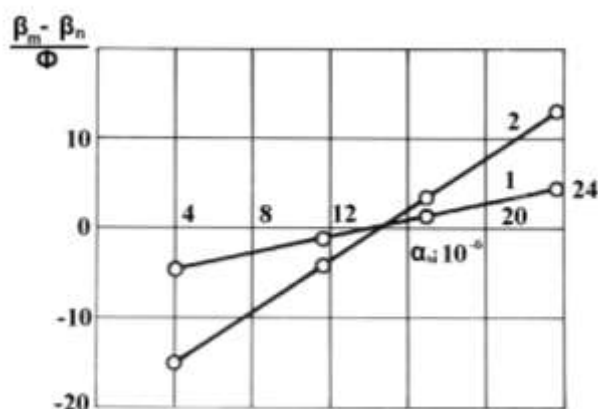


Рис. 1. График для определения коэффициента термического расширения материала тензометрическим методом [6]: 1 – при температуре 50 °С; 2 – при температуре 100 °С

и по графику (рис. 1) определяли искомый КТР материала покрытия. В каждой экспериментальной точке было произведено по три измерения.

Производилось рентгенографическое исследование искажений кристаллической решетки (внутренних напряжений второго рода) на поверхности покрытия в зависимости от факторов процесса и распределения искажений кристаллической решетки по толщине покрытия. В качестве образцов применялись вырезанные образцы из деталей с покрытием. При исследовании распределения внутренних напряжений по толщине покрытия производилось последовательное стравливание поверхностных слоев толщиной 0,05 мм гальваническим способом.

Определение искажений кристаллической решетки производилось на дифрактометре ДРОН-1.

Условия съемки рентгенограмм: излучение – FeK; напряжение на трубке – 20 кВ; анодный ток 14 мА; счетчик сцинтилляционный СРС-1; скорость вращения образца – 0,25 град/мин; скорость движения ленты самописца 2160 мм/ч.

Исходной величиной при определении искажений кристаллической решетки являлась ширина (физическое уширение) линии (220) феррита стали покрытия. Для этого площадь дифракционного максимума, найденная путем планиметрирования, делилась на высоту этого максимума (т.е. интенсивность линии (220)). После нахождения ширины линии вводилась поправка на немонохроматичность излучения и на геометрию съемки.

Величина искажений кристаллической решетки  $\Delta a/a$  вычислялась по формуле Селякова – Шерера [7]:

$$\Delta a/a = \frac{\beta}{4R} \operatorname{ctg} \theta, \quad (3)$$

где  $\beta$  – физическое уширение линии (220);  $R$  – радиус гониометра, 180 мм;  $\theta$  – угол отражения линии (220),  $73^\circ 21'$ .

Внутренние напряжения второго рода  $\sigma''$  частиц покрытия определяют по формуле

$$\sigma'' = E \Delta a/a, \quad (4)$$

где  $E$  – модуль упругости первого рода.

В каждой экспериментальной точке было получено по три значения искажений кристаллической решетки. Исследование распределения искажений кристаллической решетки по толщине покрытия производилось на пяти образцах.

**Результаты исследования.** Вклад учтенных факторов в изменчивость КТР составил 70,01 %.

Уравнение регрессии с его членами, которые более чем в четыре раза превосходят ошибку своего определения, имеет вид:

$$\begin{aligned} \alpha = & (7,243 - 0,1899Q + 0,0233L + 0,1983Cu + 0,0146Gr + 1,3500d + \\ & + 0,0134QL - 0,0275QCu - 0,0948QGr + 0,0087Qd + 0,0071LCu - \\ & - 0,0639LGr - 0,0150Ld + 0,0726CuGr - 0,2141Cud - 0,1115Grd + \\ & + 0,0314Q - 0,01193L^2 + 0,0162Cu^2 - 0,0481Gr^2 + 0,0552d^2) 10^{-6}, \text{ К}^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Графические зависимости КТР материала покрытия от факторов процесса приведены на рисунках 2 и 3.

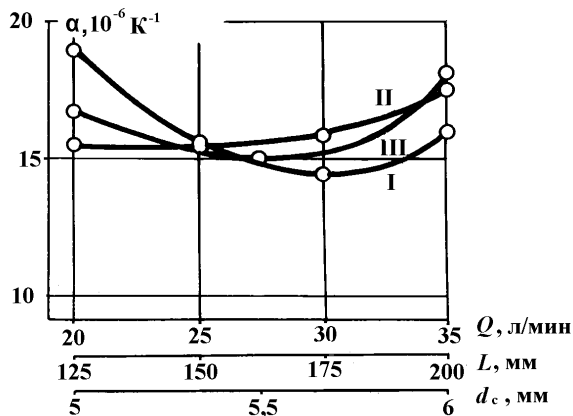


Рис. 2. Зависимость коэффициента термического расширения  $\alpha$  материала покрытия от:  
 I – расхода  $Q$  плазмообразующего газа ( $I = 325 \text{ А}$ ,  $L = 150 \text{ мм}$ ,  $Cu = 5 \%$ ,  $Gr = 100 \dots 160 \text{ мкм}$ ,  $d = 5,5 \text{ мм}$ );  
 II – расстояния  $L$  от сопла до детали ( $I = 325 \text{ А}$ ,  $Q = 25 \text{ л/мин}$ ,  $Cu = 5 \%$ ,  $Gr = 100 \dots 160 \text{ мкм}$ ,  $d = 5,5 \text{ мм}$ );  
 III – диаметра  $d$  сопла ( $I = 325 \text{ А}$ ,  $Q = 25 \text{ л/мин}$ ,  $L = 150 \text{ мм}$ ,  $Gr = 100 \dots 150 \text{ мкм}$ )

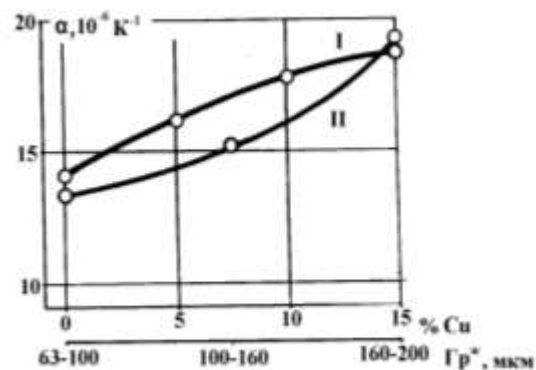


Рис. 3. Зависимость коэффициента термического расширения  $\alpha$  материала покрытия от:  
 I – процентного содержания меди в покрытии ( $I = 325 \text{ А}$ ,  $Q = 25 \text{ л/мин}$ ,  $L = 150 \text{ мм}$ ,  $Gr = 100 \dots 160 \text{ мкм}$ ,  $d = 5,5 \text{ мм}$ );  
 II – грануляции  $Gr$  исходного порошка ( $I = 325 \text{ А}$ ,  $Q = 25 \text{ л/мин}$ ,  $L = 150 \text{ мм}$ ,  $Cu = 5 \%$ ,  $d = 5,5 \text{ мм}$ )

Наибольшее влияние на изменение КТР материала покрытия оказывают процентное содержание меди в исходной композиции порошка и расход плазмообразующего газа. Меньшее влияние оказывает расстояние от сопла до детали, грануляция исходного материала и диаметр сопла. Увеличение расхода

плазмообразующего газа приводит к уменьшению КТР материала покрытия, а увеличение значений других факторов – к его увеличению.

Если степень влияния диаметра сопла на изменение КТР принять за единицу, то влияние грануляции порошка композиции составит 1,8; расстояния от сопла до детали – 1,9; расхода плазмообразующего газа – 4,9 и содержания меди – 5,2.

Изменение КТР материала покрытия проявляется посредством изменения соотношения структурных составляющих покрытия (стали, меди, алюминия и их оксидов) и зависит от напряженного состояния частиц, главным образом стальных. Между значениями внутренних напряжений второго рода и КТР материала обнаружена обратная корреляционная связь, т.е. способность материала к расширению уменьшается при увеличении его напряженного состояния.

Увеличение содержания меди в покрытии при фиксированных других факторах процесса не изменяет напряженного состояния материала, а увеличение КТР покрытия объясняется аддитивным вкладом КТР меди в величину изучаемого свойства.

Изменение КТР материала покрытия от влияния расхода плазмообразующего газа и диаметра сопла рассмотрим одновременно. Увеличение  $Q$  и уменьшение  $d$  приводят к увеличению скорости частиц металла при нанесении покрытия, увеличению энергии и степени деформации и, следовательно, к повышению напряженного состояния частиц, что уменьшает способность материала к термическому расширению. Подобным образом объясняется влияние расстояния от сопла до детали.

Резкое увеличение КТР материала покрытия при увеличении размеров частиц исходного порошка обусловлено двумя причинами: во-первых, уменьшением содержания окислов в покрытии, имеющем меньший КТР, чем у материала металлических частиц; во-вторых, уменьшением внутренних напряжений.

Внутренние напряжения ( $\sigma$ ), обусловленные уменьшением объема частиц при их охлаждении, могут быть определены с помощью закона Гука:

$$\sigma = E \frac{\sqrt[3]{\delta_2} - \sqrt[3]{\delta_1}}{\sqrt[3]{\delta_1}}, \quad (6)$$

где  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – удельные массы частиц в полужидком и твердом состояниях.

Пластическое деформирование приводит металл в статически неустойчивое состояние вследствие искажений кристаллической решетки. Затем протекают процессы, возвращающие металл в более устойчивое состояние со снятием искажений кристаллической решетки и ростом зерна. Снятие искажений кристаллической решетки (возврат) не требует высокой температуры, уже при 300...400 °C в стальных частицах происходит незначительное перемещение атомов [8]. Возврат не сопровождается изменением микроструктуры. Процессы возврата и рекристаллизации протекают с конечной скоростью, зависящей от свойств упрочненного металла, поэтому их завершение требует определенного времени.

Таким образом, величина внутренних напряжений, возникающих в кристаллитах покрытия, является сложной функцией, зависящей от величины пластической деформации, температуры и скорости охлаждения частиц покрытия, взаимного термического влияния частиц и слоев покрытия.

От величины внутренних напряжений второго рода (структурных напряжений) зависит износостойкость поверхностного слоя покрытия, его твердость и способность материала к термическому расширению.

Уравнение регрессии между величиной искажения кристаллической решетки  $\Delta a/a$  и влияющими факторами имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta a/a = & (11,203 + 0,00490I + 0,01189L - 0,00948Gr - 1,3240d + 0,0541IL + \\ & + 0,0073IGr - 0,0269Id + 0,0093LGr + 0,0448Ld - 0,0936Gpd - \\ & - 0,0717I^2 - 0,0407L^2 - 0,0314Gr^2 + 0,1170d^2) \cdot 10^{-3}, \text{ рад.} \end{aligned} \quad (7)$$

Вклад учтенных факторов в изменчивость  $\Delta a/a$  составил 77,36 %. Графические зависимости искажений кристаллической решетки от наиболее значимых факторов процесса приведены на рисунке 4.

Наибольшее влияние на изменение внутренних напряжений второго рода в частицах покрытия оказывают диаметр сопла  $d$ , расстояние от сопла до детали  $L$  и грануляция частиц порошка  $Gr$ ; меньшее значение оказывает сила тока  $I$  плазменной дуги. Влияние других факторов незначительно. Увеличение  $I$  и  $L$  приводит к увеличению  $\Delta a/a$ , а увеличение  $Gr$  и  $d$  – к их снижению. Если степень влияния тока плазменной дуги на изменение  $\Delta a/a$  принять за единицу, то степень влияния грануляции частиц порошка составит величину 1,76; расстояние от сопла до детали – 2,01 и диаметра сопла – 3,5. К уменьшению  $\Delta a/a$  приводит, главным образом, вложение тепла в материал покрытия плазменным факелом, чем определяется полнота процесса рекристаллизации.

Уменьшение  $\Delta a/a$  при движении вглубь покрытия (рис. 5) связано с отжигающим действием последующих слоев покрытия во время его нанесения.

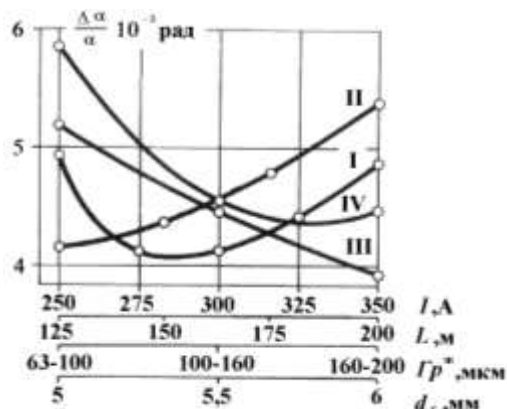


Рис. 4. Зависимость искажений кристаллической решетки  $\Delta a/a$  железа в покрытии от:

I – силы тока  $I$  плазменной дуги ( $Q = 25$  л/мин,  $L = 150$  мм,  $Cu = 5\%$ ,  $Gr = 100...160$  мкм,  $d = 5,5$  мм); II – расстояния  $L$  от сопла до детали ( $I = 325$  А,  $Q = 25$  л/мин,  $Cu = 5\%$ ,  $Gr = 100...160$  мкм,  $d = 5,5$  мм); III – грануляции  $Gr$  исходного порошка ( $I = 325$  А,  $Q = 25$  л/мин,  $L = 150$  мм,  $Cu = 5\%$ ,  $d = 5,5$  мм); IV – диаметра  $d$  сопла ( $I = 325$  А,  $Q = 25$  л/мин,  $L = 150$  мм,  $Gr = 100...150$  мкм)

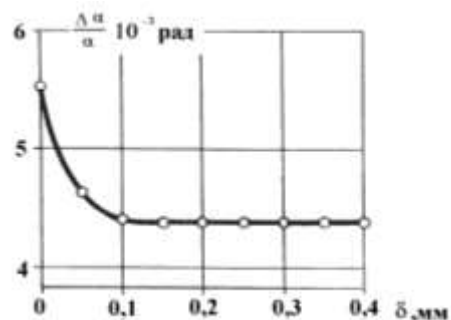


Рис. 5. Распределение искажений кристаллической решетки  $\Delta a/a$  по толщине покрытия:

$\delta$  – расстояние от поверхности покрытия до исследуемого слоя.  
Режим нанесения покрытия:  
 $I = 325$  А;  $Q = 25$  л/мин;  $L = 150$  мм;  
 $Cu = 5\%$ ;  $Gr = 100...160$  мкм;  $d = 5,5$  мм

С увеличением расстояния от сопла до детали скорость летящих частиц уменьшается линейно, а теплопередача от плазменного факела уменьшается значительно быстрее – по квадратной параболе. При этом уменьшение скорости частиц приводит к уменьшению  $\Delta a/a$ , а уменьшение величины вложения тепла – к увеличению этой величины. Превалирование второго эффекта над первым приводит к увеличению внутренних напряжений второго рода при увеличении расстояния от сопла до детали.

Кривая зависимости  $\Delta a/a$  при изменении силы тока имеет ярко выраженный минимум. Большие значения напряжений при малых значениях силы тока объясняются малым вложением тепла в материал покрытия и небольшой степенью рекристаллизации, а при больших значениях тока – большой степенью пластической деформации частиц.

Крупные частицы не успевают охладиться в полете так, как мелкие. Кроме того, в покрытии из крупных частиц процессы возврата и рекристаллизации протекают более полно, вследствие большей теплоемкости покрытия и температуры его слоев. Это приводит к снижению  $\Delta a/a$  при увеличении грануляции частиц покрытия.

Значительное уменьшение внутренних напряжений второго рода при увеличении диаметра сопла связано, на наш взгляд, с меньшей величиной наклепа частиц за счет меньшей скорости струи, а следовательно и наносимых частиц.

**Вывод.** Приведенные качественные и количественные зависимости влияния состава исходного материала и значений режимов плазменного напыления покрытий из порошков позволяют управлять коэффициентом термического расширения материала покрытий и внутренними напряжениями в них.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Черноиванов, В.И. Требования к технологическим процессам восстановления изношенных деталей / В.И. Черноиванов, Э.С. Каракозов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1989. – № 4. – С. 50 – 52.
2. Nakamura, A. Tribology in racing engines / A. Nakamura // Tribology monthly. – 1988. – № 9.
3. Kurosawa, K. Preparation of wear resistant coating by composite deposits / K. Kurosawa et, al. // Hyomengijutsu. – 1990. – Vol. 41, № 11.
4. Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.]; под ред. В.П. Иванова – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
5. Френкель, Я.И. Введение в теорию металлов / Я.И. Френкель. – Л.: Наука, 1972. – 424 с.
6. Нехендзи, Е.Ю. Тензометрический метод определения коэффициентов теплового расширения материалов / Е.Ю. Нехендзи // Заводская лаборатория. – 1965. – Т. XXXI, № 5. – С. 65.
7. Русаков, А.А. Рентгенография металлов / А.А. Русаков. – М.: Атомиздат, 1977. – 479 с.
8. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 541 с.

Поступила 17.01.2007